

# 2° MEETING IU.NET

## Udine, 10-11 Febbraio 2011

RELAZIONE SUL PROGETTO

# GRAND

## Graphene-based Nanoelectronic Devices



# Obiettivo del progetto

- Lo scopo del progetto è quello di realizzare dispositivi in grafene (transistori e interconnessioni) basati, almeno inizialmente su nanoribbon; comprendere la correlazione tra qualità del dielettrico, numero di layer, funzionalizzazione chimica e proprietà di trasporto; lo sviluppo di tecniche di fabbricazione del grafene; la caratterizzazione sperimentale del trasporto e del rumore, la simulazione delle proprietà di trasporto con tecniche a diverso livello di approssimazione: atomistico, tight-binding e Monte Carlo semiclassico; analisi dell'influenza degli hot phonon tramite simulazioni e misure a bassa temperatura.
- Il progetto è stato il risultato della fusione di due proposal iniziali su dispositivi in grafene, una portata avanti da AMO, dove era stato realizzato il primo transistor top-gate in grafene e l'altra che era in corso di preparazione da parte di UCAM e dell'unit à di Pisa di IU.NET.

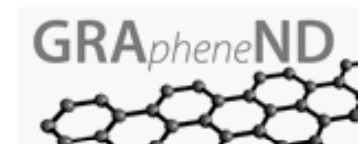


## Partecipanti al progetto GRAND:

- AMO GmbH (DE), coordinatore: fabbricazione di dispositivi e caratterizzazione elettrica
- University of Cambridge (UK): caratterizzazione con tecniche scanning probe
- IUNET (IT): simulazione dei dispositivi e delle proprietà di trasporto, misure di rumore, realizzazione di modelli compatti
- CEA Grenoble (FR): simulazione ab-initio e crescita di grafene su SiC
- Tyndall National Institute (IE): funzionalizzazione chimica del grafene
- Inizialmente presente anche ST



- Sedi IU.NET partecipanti
- Bologna: Sviluppo di un modello di trasporto 1-D basato sulle funzioni di Green di non equilibrio con l'inclusione di effetti di non parabolicità delle bande e del contributo dovuto allo scattering con fononi acustici e ottici
- Pisa: Sviluppo di un modello di trasporto elastico 3-D per la simulazione di transistori a nanoribbon, nell'ambito di un approccio tight-binding, inclusione di modelli derivati da approcci ab-initio per trattare l'effetto di atomi droganti, caratterizzazione sperimentale fino alle basse temperature, sviluppo di modelli compatti
- Udine: Sviluppo di un modello di trasporto 1-D semiclassico basato su tecniche Monte Carlo, con l'inclusione di modelli di scattering per le nonuniformità del nanoribbon e per l'effetto dei fononi



## Impegno delle sedi IU.NET

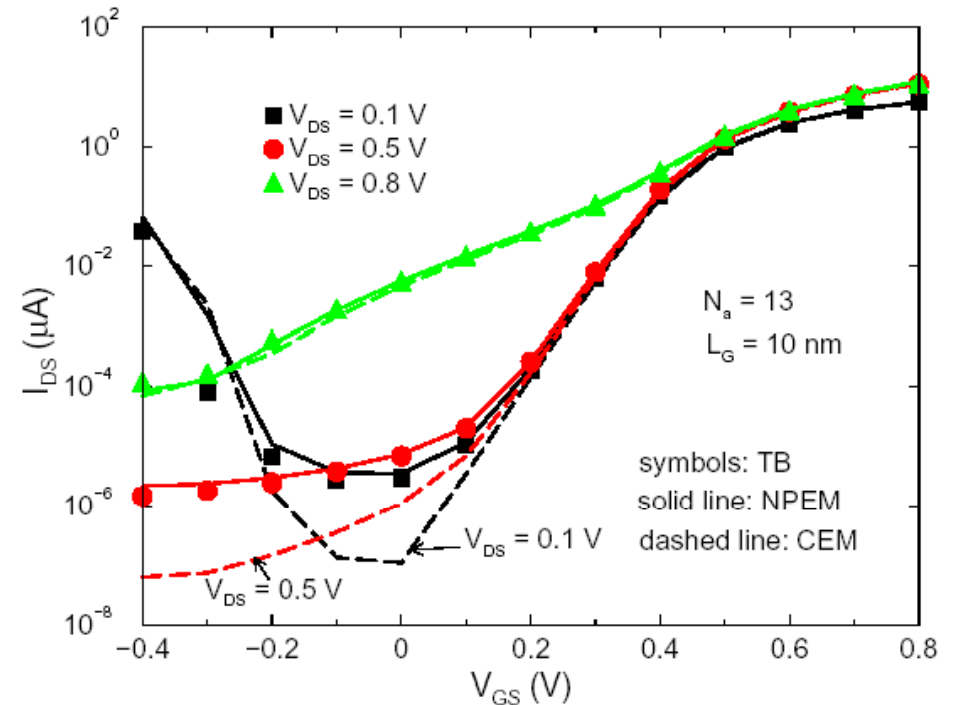
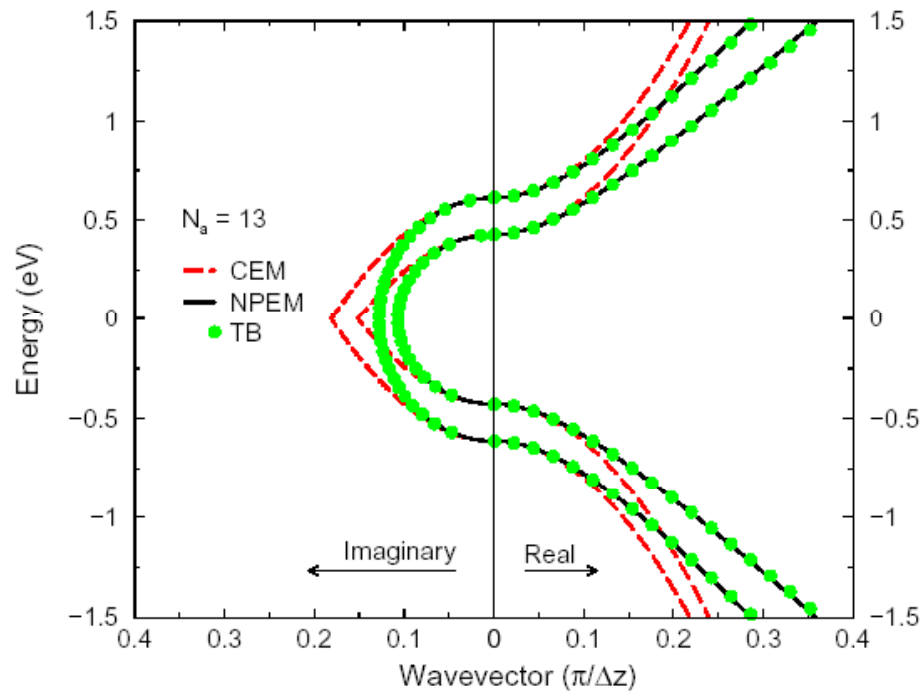
- Bologna: 20 mesi uomo
- Pisa: 28 mesi uomo
- Udine: 20 mesi uomo

## Interazioni tra sedi IU.NET:

- I risultati della caratterizzazione elettrica di campioni di grafene sono stati trasferiti da Pisa a Bologna, per essere utilizzati nello studio di possibili applicazioni del grafene in applicazioni analogiche
- È stato svolto un confronto dei risultati per la mobilità in nanoribbon di grafene ottenuti a Udine e a Pisa

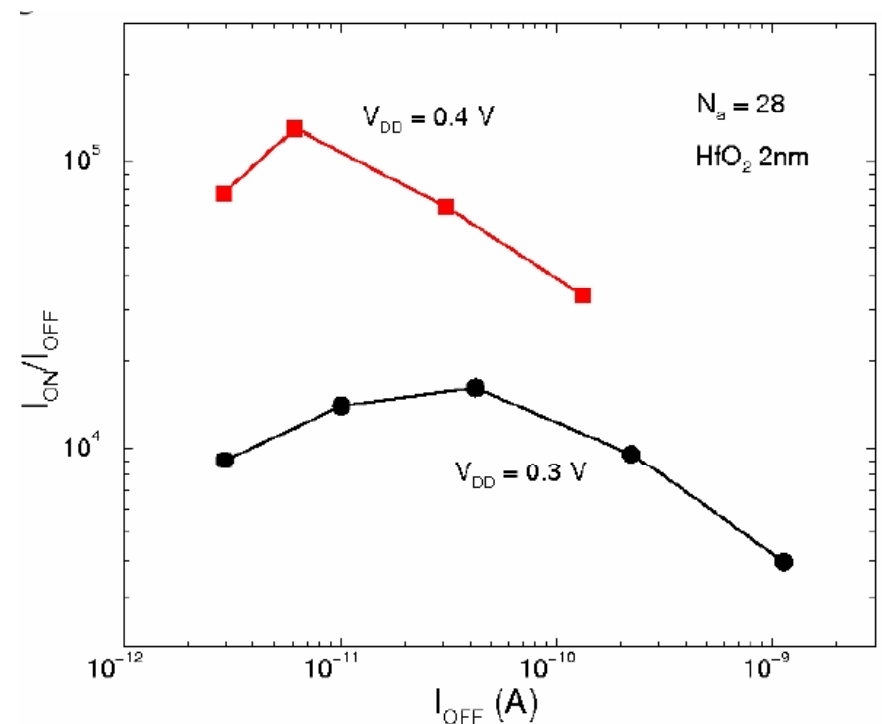
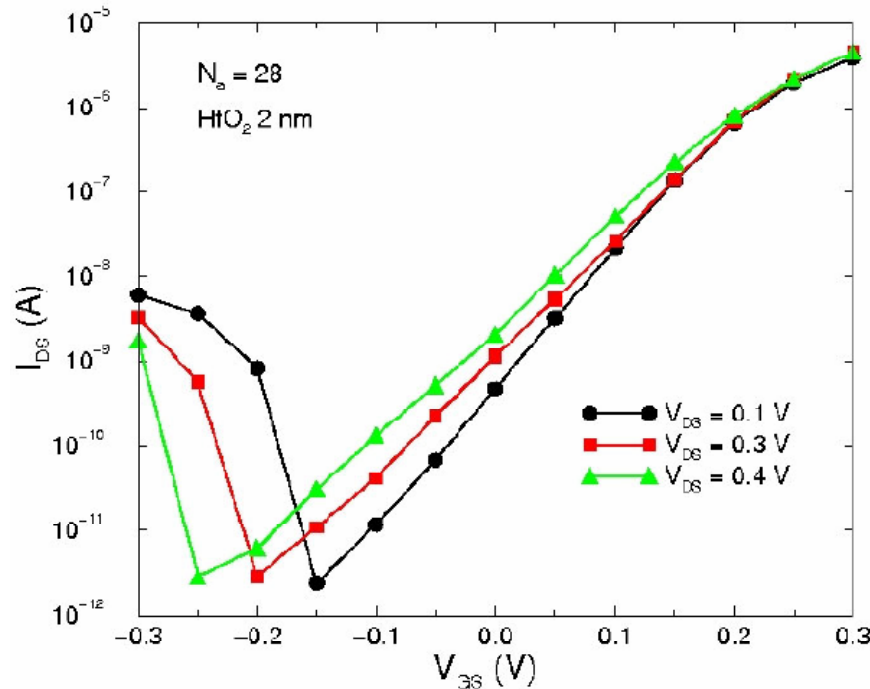


- Development of a 1D (i.e. per decoupled subbands) full quantum transport + Poisson equation simulation tool of GNR-FETs based on effective mass with non-parabolic corrections.

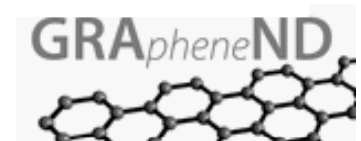


Comparison of band structure and I-V characteristics with tight-binding (TB), constant EM (CEM) and non-parabolic EM (NPEM) models.

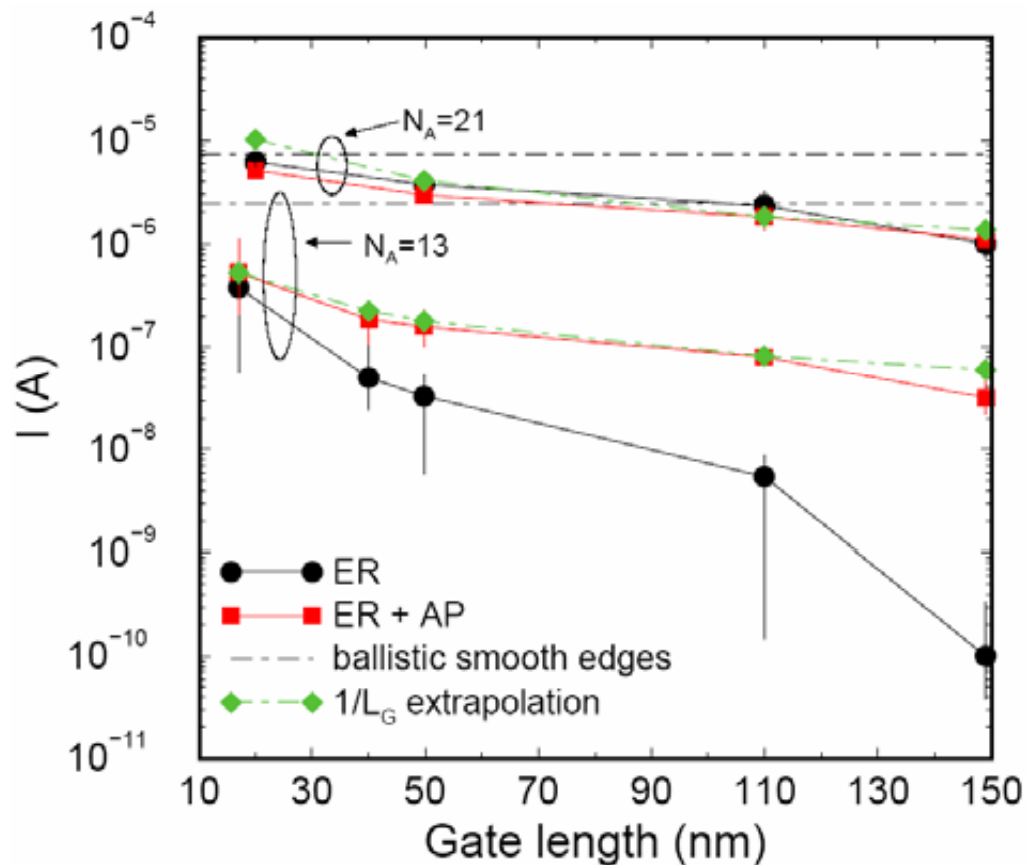
- Application of the non-parabolic effective mass model to the optimization of GNR-FETs for digital applications.



Double-gate GNR-FET with HfO<sub>2</sub>: maximum GNR width is 3.3 nm to achieve a minimum ON/OFF current ratio of 10<sup>4</sup>



- Simulation of GNR-FETs with real-space and mode-space TB approach including elastic phonon scattering and edge roughness.

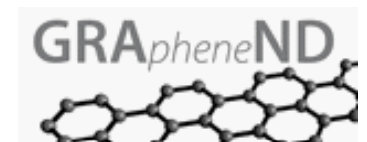


Localization regime due to edge roughness and phase-breaking effect of phonon scattering.

Calculated and experimental mobility for a 2.5 nm GNR:

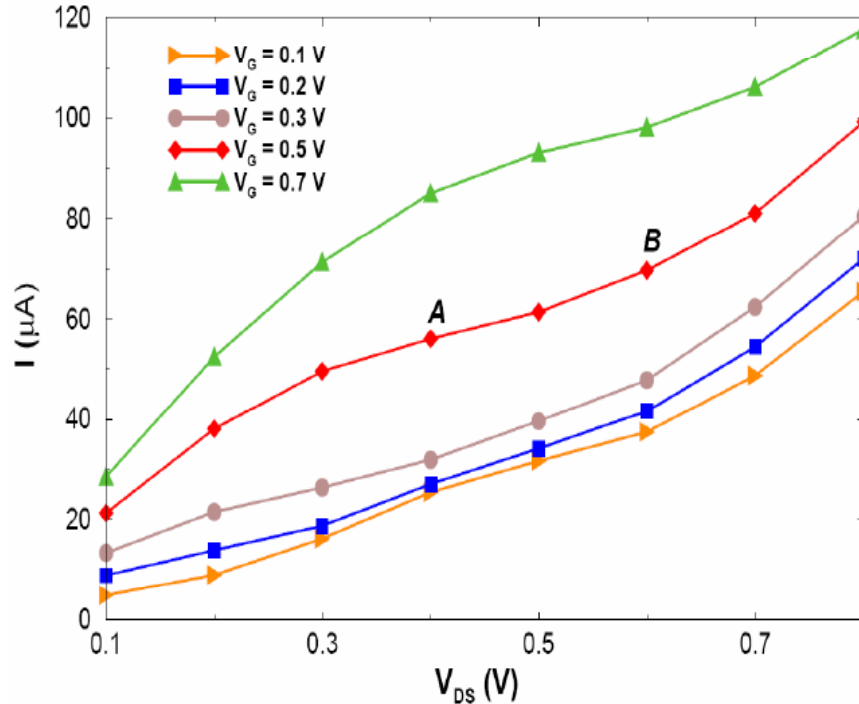
$$\mu_{\text{cal}} = 380 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_{\text{exp}} = 170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$





- Evaluation of wide GNR-FETs for analog applications

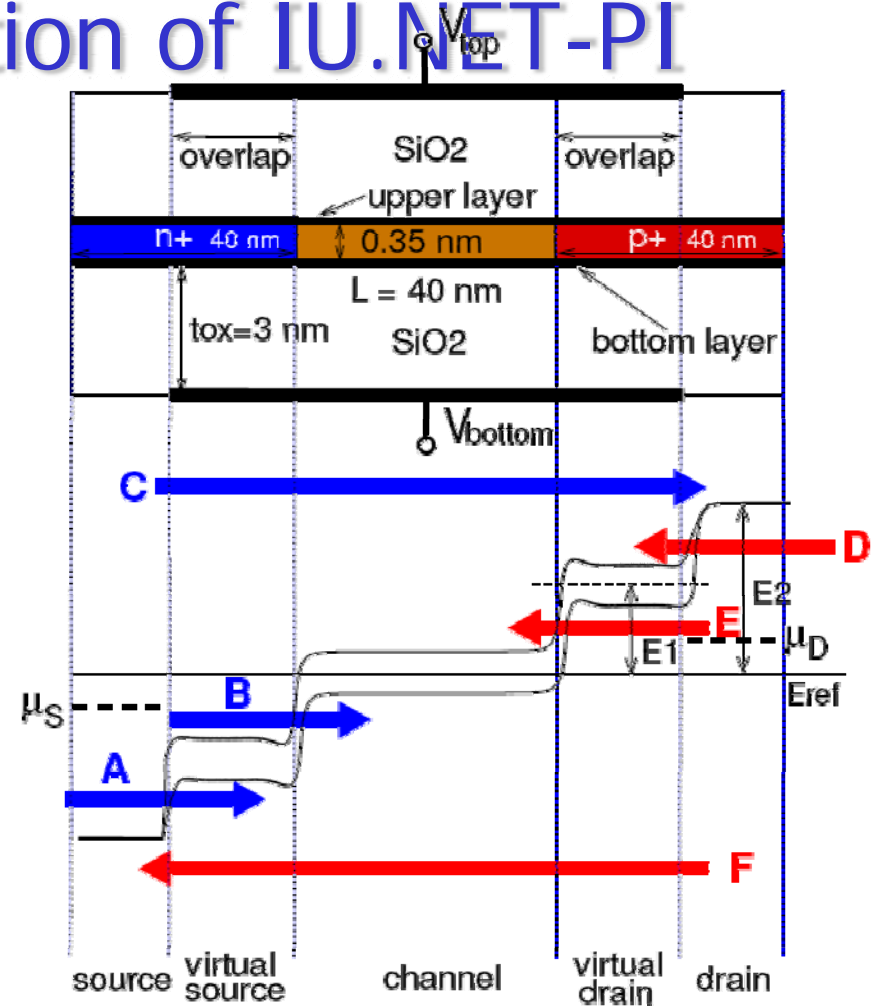
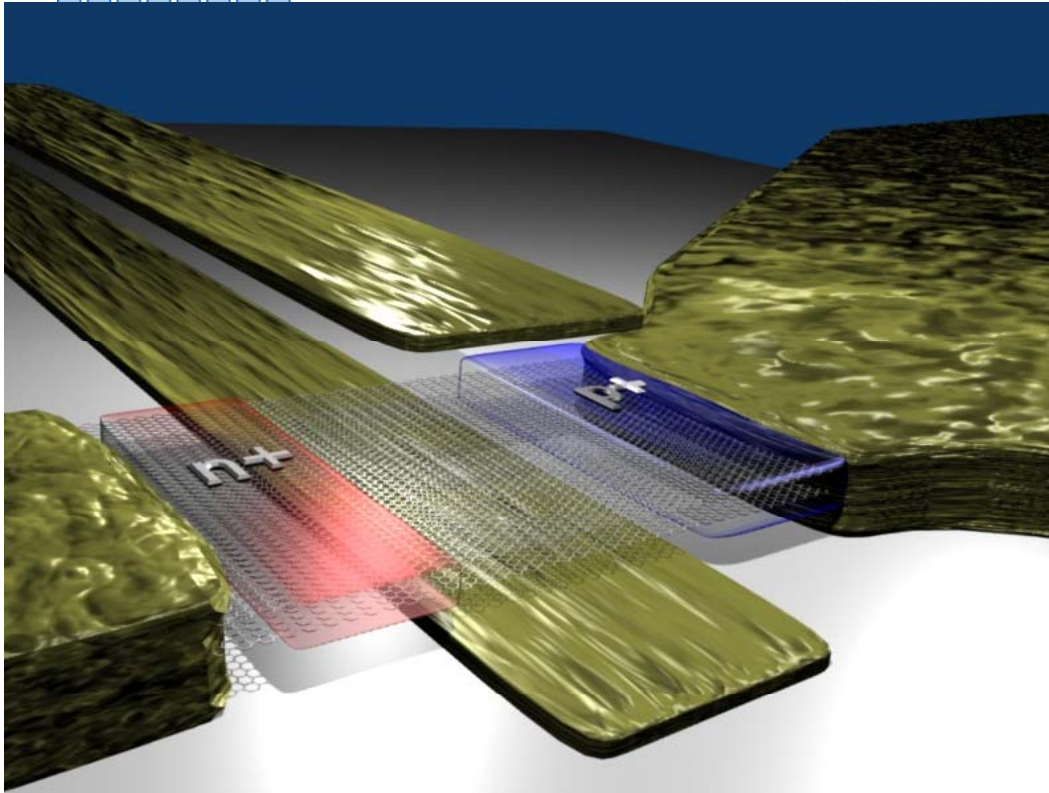


Problem with wide GNRs: lack of a clear saturation region and small voltage gain.

$W = 10$  nm

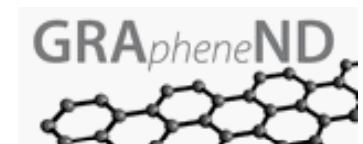
$W = 15$  nm

$N_a$	$L_G$ [nm]	Model	$g_m$ [ $\mu$ S]	$g_d$ [ $\mu$ S]	$C_{gs}$ [aF]	$A_v$	$f_T$ [THz]
82	10	bal	116	6.6	2.7	17.6	6.8
		AP	83	6.3	2.7	13.2	5.0
	20	bal	129	6	4.6	21.5	4.4
		AP	90.3	10.3	4.8	8.7	3
124	10	bal	168.3	25.8	4.4	6.5	6
		AP	146	26.7	4.3	5.5	5.4
	20	bal	175.3	31.6	9.3	5.5	3
		AP	148	31.7	8.6	4.7	2.7



- We have explored the possibility of TFETs based on bilayer graphene.
- No EBL restrictions as in GNRs.
- Proper band engineering in order to reduce the tunneling current in the OFF state.

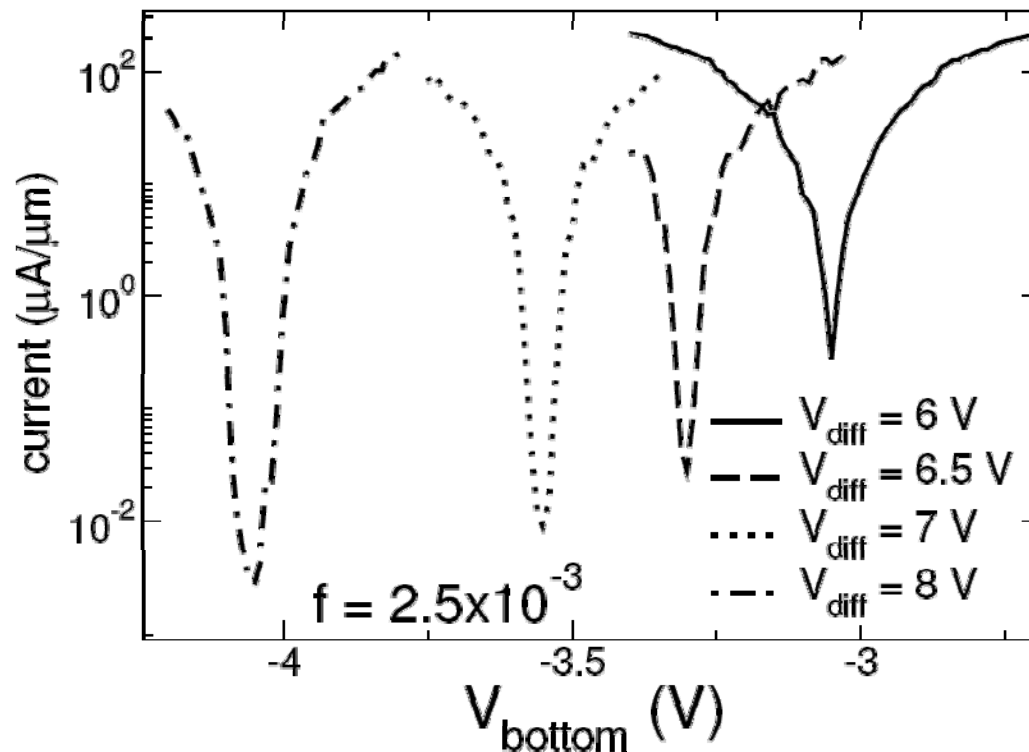
IEEE EDL, 30, (2009), 1096.



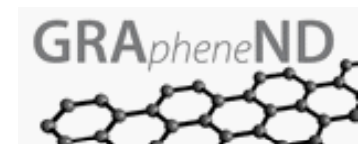
# Tunnel FET Bilayer graphene FET

## ■ Tight-binding simulations ( $V_{DS}=0.1$ V)

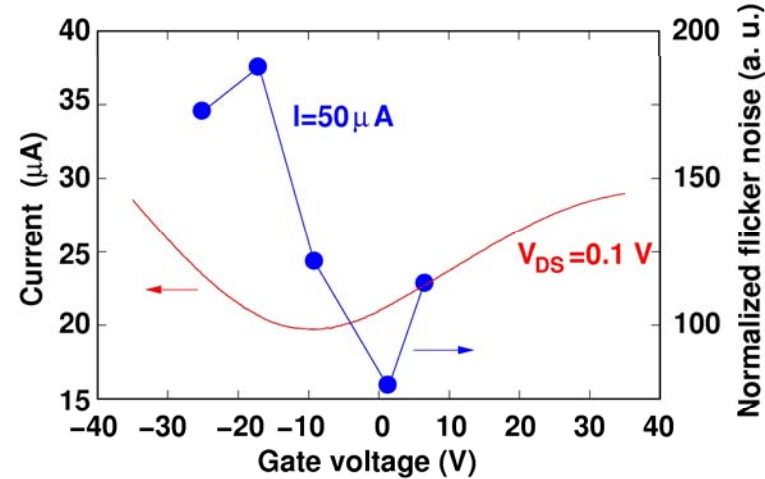
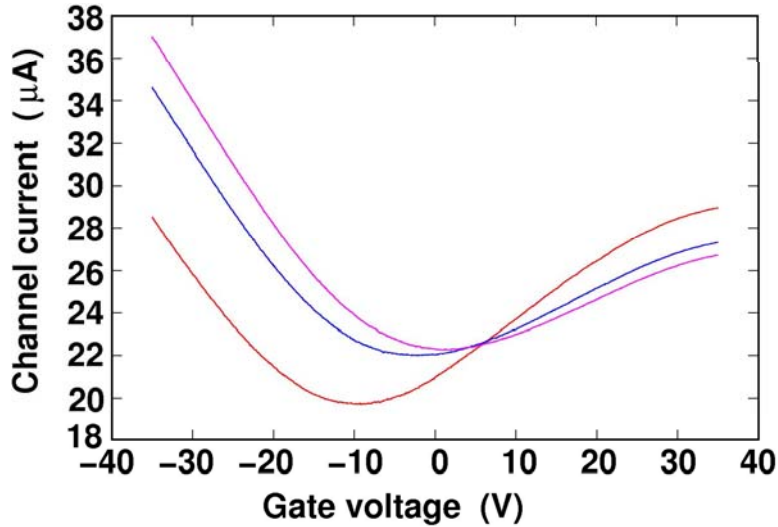
- $SS < 20$  mV/dec
- $I_{on}/I_{off} \approx 10^3 - 10^4$



TFETs are promising also for a channel of epitaxial graphene on SiC, Michetti et al. APL 2010.

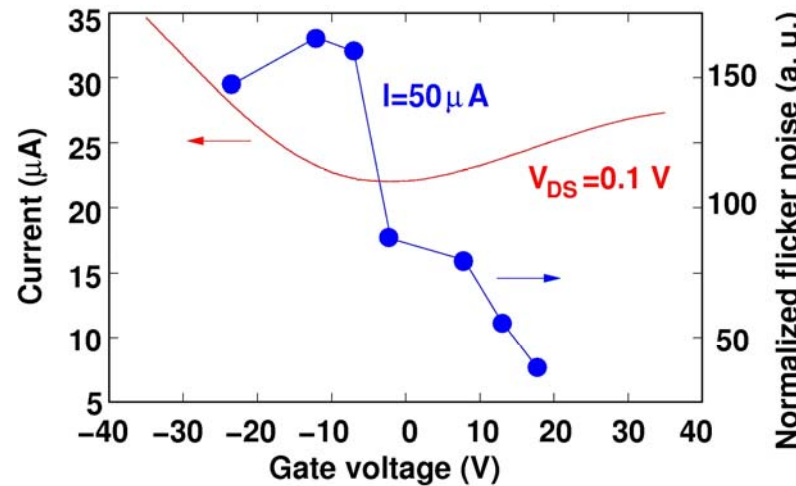
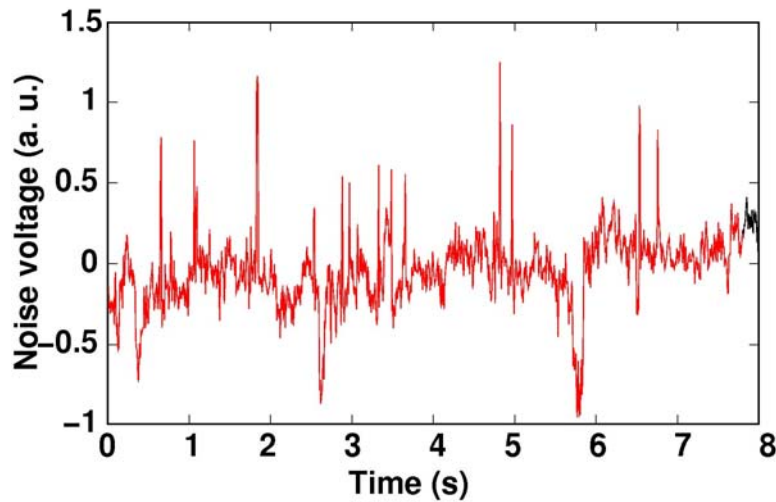


# Noise characterization

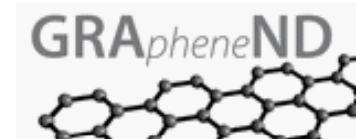


Normalized flicker noise (a. u.)

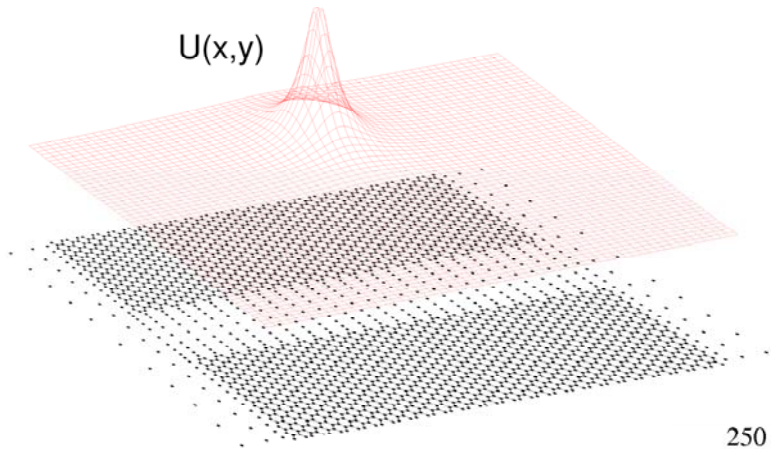
Device I\_593  
I-V characteristics and noise behavior vary in time during vacuum exposure



Normalized flicker noise (a. u.)

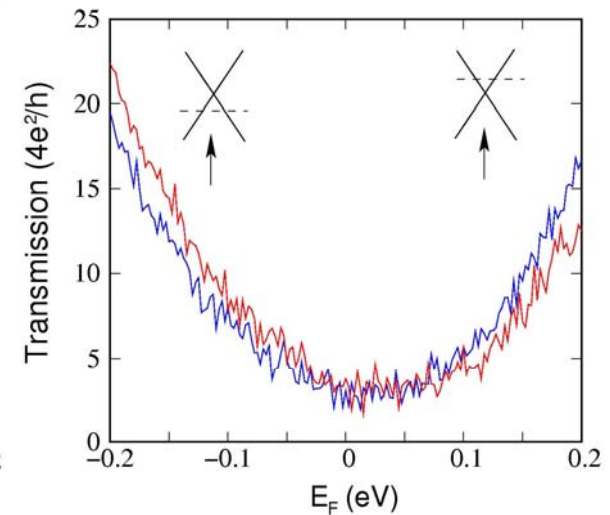
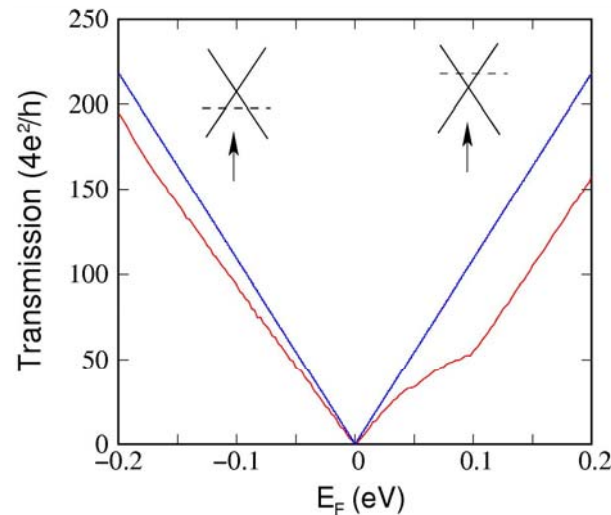


# Dirac equation

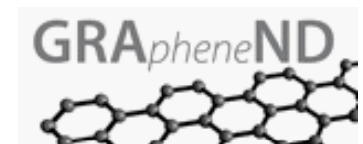


The aim of this work is to provide understanding for the scanned gate conductance spectroscopy experiments performed in Cambridge on flakes with a width around 1 micron

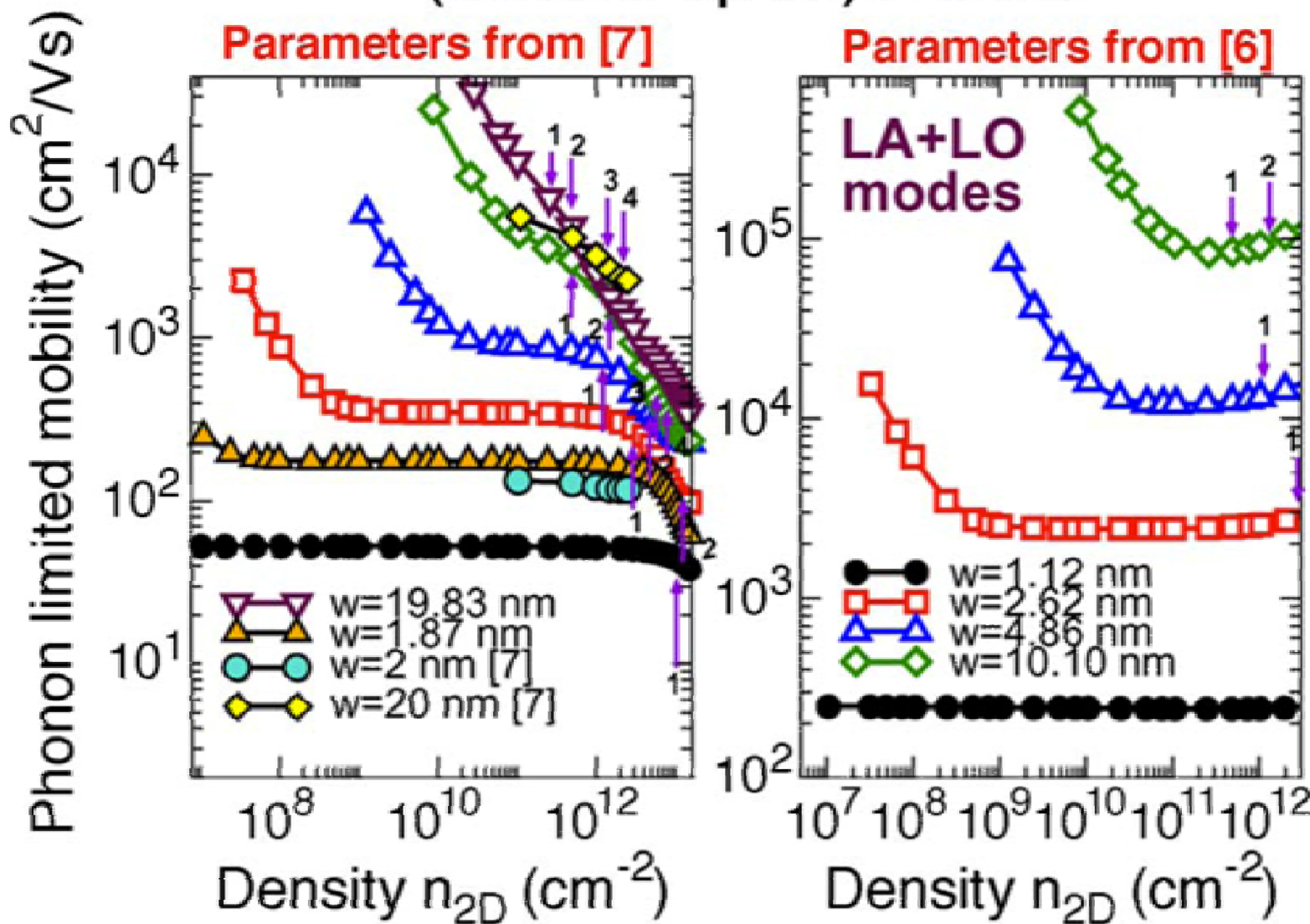
A diffusive behavior is found to be required for the postulated explanation of the action of the probe on the flake conductance



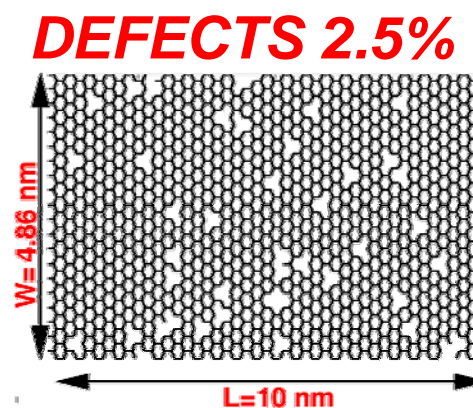
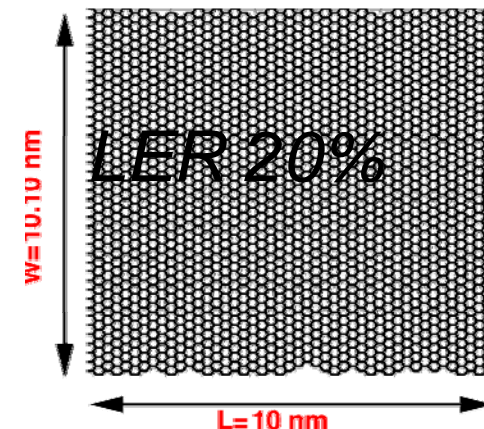
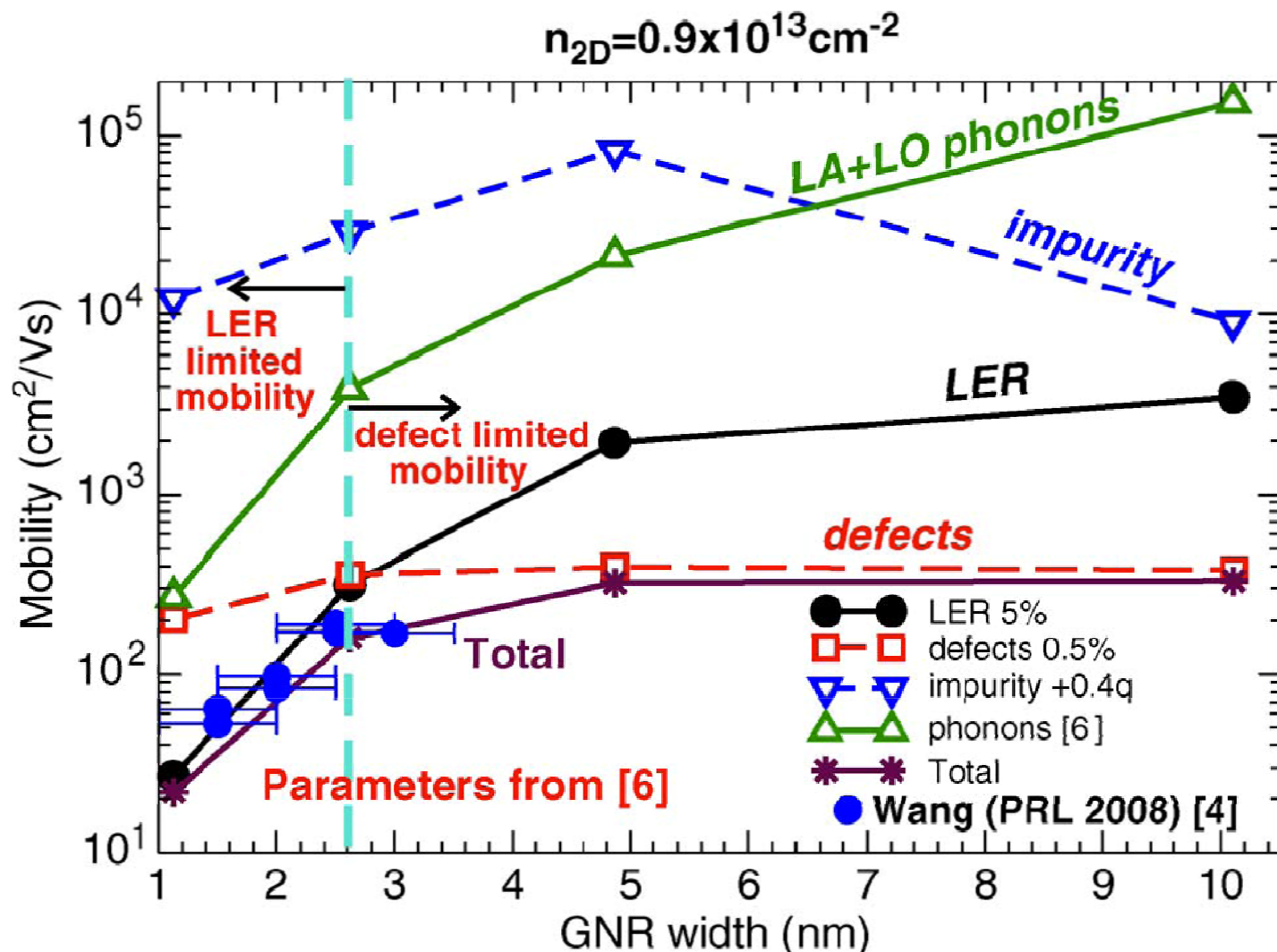
Dalla soluzione dell'equazione di Dirac e' anche risultato che nel grafene, in conseguenza della natura spinoriale delle funzioni d'onda, risulta violata la simmetria  $PT$



## (Acoustic+Optical) Phonons



- Experimental mobility can be reproduced by means of LER 5%

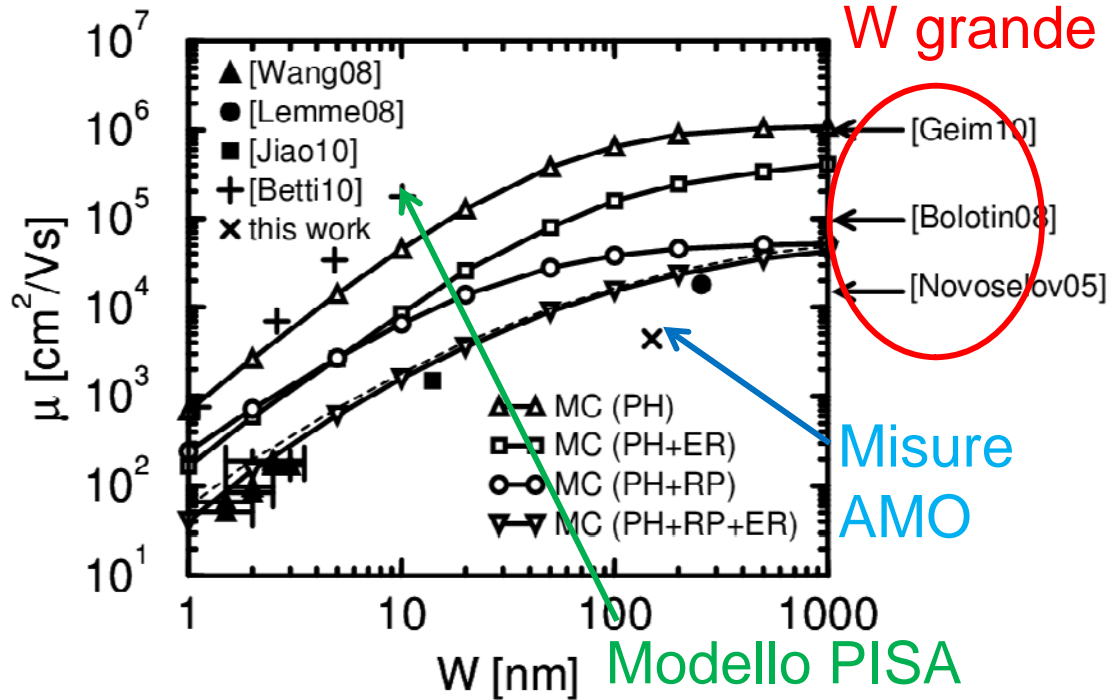


- Sviluppo di modelli semiclassici per fogli di grafene (mono- e bi-layer) e nano-ribbons
- Focus su ribbon larghi per confronto con esperimenti
- Campioni «lunghi»:
  - Mobilità
  - Velocità di saturazione
- Investigare i meccanismi di scattering dominanti nei vari range di temperatura e larghezza del ribbon
- Limitate attività di misure di mobilità
- Trasporto quasi-balistico (semi-classico) in transistori al grafene per RF

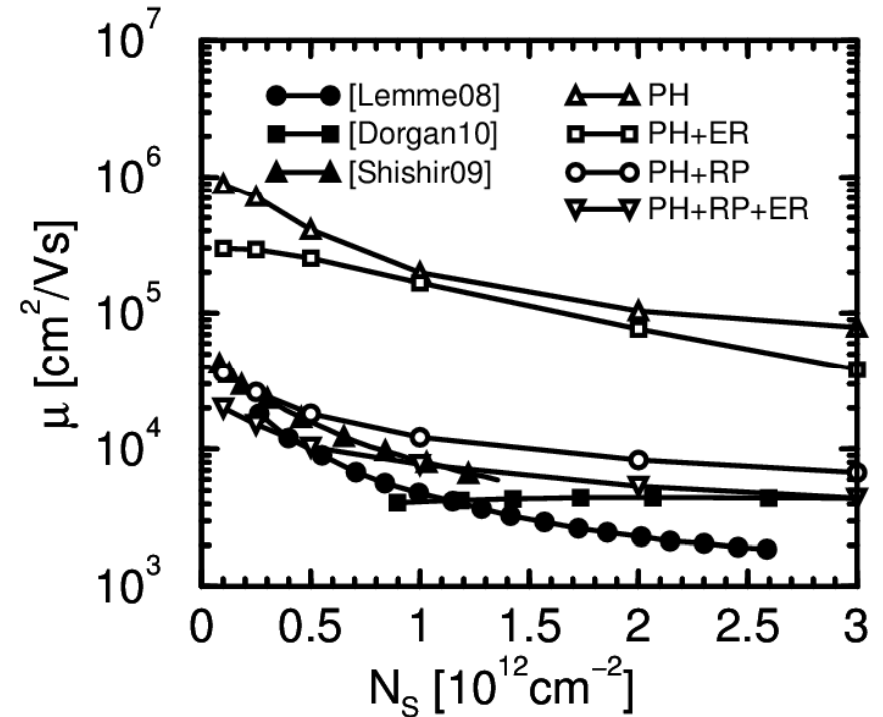




Mobilità vs. width a bassa  $N_s$



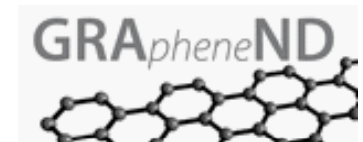
Mobilità vs.  $N_s$  per W grandi



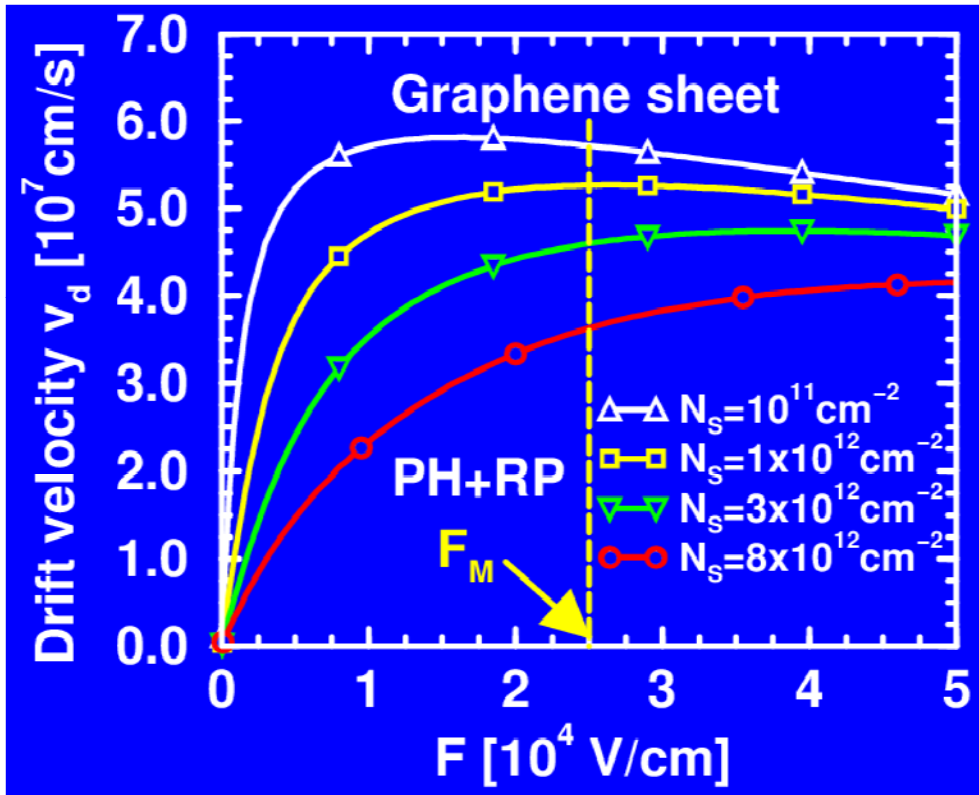
## Meccanismi:

- PH-fononi locali
- ER-edge roughness
- RP-fononi remoti

Tutti i meccanismi concorrono nel determinare la mobilità

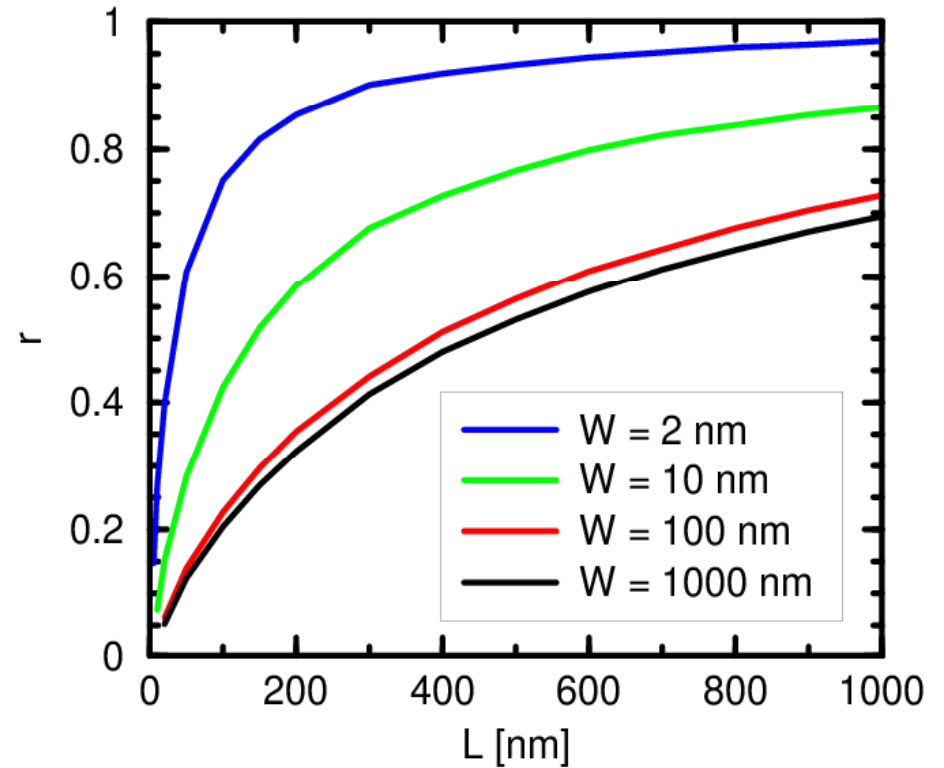


Curve velocità / campo

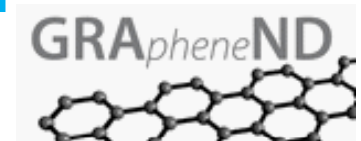


Ad alte  $N_s$   $\mu$  è più degradata di  $v_{sat}$

Back-scattering vs. L a bassa  $N_s$



Bassa  $\mu$  per W piccoli  
 $\rightarrow$  r alto



# IU.NET nel progetto (-)

Una difficoltà tecnica è consistita nella preparazione dei campioni per l'effettuazione delle misure di rumore a Pisa: poiché il bonding non poteva essere realizzato in modo efficace ad Aachen, inizialmente si è pensato di far effettuare il bonding a Cambridge, ma i campioni sono poi risultati danneggiati; successivamente è stato tentato un bonding ad Aachen realizzato tramite deposizione di pasta conduttiva, ma i risultati sono stati scadenti; infine è stato messo a punto un processo di bonding a Pisa, con buoni risultati.

In termini di input per futuri progetti potrebbe essere utile, nel caso di fornitura di dispositivi per la caratterizzazione da partner esterni, fissare fin dall'inizio uno scheduling molto preciso per le consegne e le esatte incombenze nel flusso di preparazione degli stessi

